تعیین ضریب رفتار مخزن‌ها بتنی استوانه‌ای با استفاده از تحلیل فزاینده غیرخطی*

لیلا کلانی ساروکلائی(۱)   بهرام نوائی نیا(۲)

چکیده در این پژوهش ضریب رفتار ناشی از شکل پذیری و اضافه مقاومت مخزن‌های بتنی زمینی و هوایی استوانه‌ای شکل با الگوسازی مخزن و سیال داخل آن به روش اجزای محدود به دست آمد. برای این هدف، از تحلیل ایستای فزاینده غیرخطی و شکل مودهای موثر در حرکت جانبی سازه استفاده شد. برای الگوسازی رفتار غیرخطی مصالح بتنی از الگوی پنج عاملی ویلیام و وارنکه و برای فولاد از الگوی کشسان-مومسان کامل بهره گرفته شد. الگوسازی رفتار آب داخل مخزن به دلیل نبود امکان روی دادن رفتار غیرخطی، به صورت خطی انجام پذیرفت. میلگردهای داخل بتن هم به صورت دقیق و هم به صورت درصد حجمی در نظر گرفته شدند. با چشم پوشی از اندرکنش خاک و سازه، در چندین حالت مختلف سطح‌های عملکرد سازه با تغییر عامل‌های گوناگون مانند ارتفاع، ضخامت، شعاع و درصد میلگرد پایه و پوسته، ضخامت وابعاد سخت‌کننده‌های کف و نیز ارتفاع آب داخل مخزن، بررسی و ضریب رفتار مخزن‌های بتنی استوانه‌ای تعیین شد. نتیجه ها بیانگر آن است که ویژگی‌های پایه بیشتر روی ضریب رفتار این سازه اثر می‌گذارند، به طوری‌که این ضریب برای سطح های عملکرد اولین ترک در پوسته منبع گسترش ترک در آن، در مخزن های هوایی از حدود ٤ و ٥ و در مخزن های زمینی از حدود ۱ و ۲ تغییر می‌یابد.

واژه‌های کلیدی ضریب رفتار، مخزن‌ها بتنی استوانه‌ای، تحلیل فزاینده غیرخطی

Evaluation of modification factor for concrete cylindrical tanks using pushover analysis

L. Kalani Sarokolayi   B. Navayi Neya

Abstract *In this paper the response modification factor due to ductility and saved strength of cylindrical concrete elevated and ground tanks is obtained using finite element method and nonlinear push over analysis considering the lateral effective modes of tanks. To modeling the behavior of the tank materials, the five parameters William-Warnke and prefect elastoplastic models are used for concrete and reinforcement rebars respectively. In the calculations the reinforced bars are modeled both exactly and as percentage of concrete surface area. In addition it is assumed that the foundation of the structure is absolutely rigid and contained water has linear behavior. The response modification factor is obtained for different performance levels by changing different parameters such as height, thickness, radius, and percentage of the reinforcementbars of the shaft and shell, thickness and dimensions of stiffener and water level. The obtained results show that the factor for the elevated tanks changes between 4and 5 and the factor for the ground tanks varies between 1 and 2.5 these changes depend on the performance levels for the tanks.*

Key Words Response Modification Factor, Cylindrical Concrete Tanks, Pushover Analysis

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۹/۸/۲۵ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۹۰/۹/۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(۲) نویسنده‌ی مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مقدمه

مخزن‌های ذخیره آب، از نظر چگونگی قرارگیری به دو شکل پایه‌دار یا هوایی و زمینی، تقسیم‌بندی می‌شوند[۱]. به دلیل نقش بسیار مهمی که این سازه‌ها پس از روی دادن زلزله برای خاموش کردن آتش، فراهم کردن آب آشامیدنی و بهداشتی و مانند این‌ها دارند، از جمله سازه‌های با اهمیت زیاد به شمار می‌روند. بنابراین، بررسی عملکرد مطمئن و بی‌وقفه آن‌ها در برابر زلزله‌های شدید احتمالی در کشور بسیار اهمیت دارد. به طوری‌که در آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران ضریب اهمیت این سازه‌ها حداکثر و برابر ۱/٤ در نظر گرفته می‌شود[۲]. از سوی دیگر، وجود آب در این سازه‌ها و مساله اندرکنش سازه و سیال باعث پیچیدگی تحلیل لرزه‌ای آن‌ها می‌شود.

مساله تعیین فشار هیدرودینامیک برای مخزن‌های دارای مایعات در اثر زلزله، اولین بار در سال ۱۹۶۳ توسط Housner [3] پیشنهاد داده شد. او با فرض رفتار صلب مخزن توانست مقدارهای تقریبی بسامد به هم خوردن سیال و فشار هیدرودینامیکی نوسانی را برای مخزن‌های مستطیلی و استوانه‌ای ارائه دهد. در ادامه، تاثیر انعطاف‌پذیری مخزن توسط Kana and Dodge [4] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در پژوهش‌های خود نشان دادند که با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مخزن، نیروی ضربه‌ای وارد به مخزن از طرف سیال بیشتر می‌شود. در حال حاضر بیشتر استانداردهای طراحی لرزه‌ای مخزن‌ها از جمله[5] API650 برای به دست آوردن بارهای ناشی از زلزله براساس الگوی مکانیکی Housner و براساس تحلیل شبه ایستای عمل می‌کنند. چند پژوهش درباره تحلیل مخزن‌ها توسط شکیب[٦] انجام شده است. وی با به کار بردن روش‌های تحلیلی مختلف به بررسی پاسخ مخزن‌های بتنی هوایی زیر اثر نیروی زلزله و نیز بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر دیواره مخزن و اثر اندرکنش آب و مخزن پرداخته و در نهایت روش تحلیلی مناسبی برای تحلیل این گونه سازه‌ها متناسب با شرایط و مسائل کشور پیشنهاد داده است. در سال‌های اخیر با روی کار آمدن نرم‌افزارهای پیشرفته اجزای محدود با قابلیت تحلیل غیرخطی، پژوهشگران بسیاری تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی مخزن‌ها را مورد توجه قرار دادند. رحیم‌زاده و همکاران[7] به بررسی پدیده تشدید در پاسخ دینامیکی مخزن‌ها دارای مایعات پرداختند. نوائی‌نیا وکلانی مخزن‌ها هوایی را در اثر نیروی زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه به روش‌های لاگرانژی- لاگرانژی و اویلری- لاگرانژی تحلیل و نتیجه‌ها را با تحلیل ایستای معادل بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران مقایسه کردند[۹، ۸]. ایشان در ادامه به بررسی ضریب رفتار مخزن‌های آب هوایی و زمینی به روش اجزای محدود پرداخته و سطح عملکردگسیختگی کامل مخزن‌ها را مورد نظر قرار دادند[۱۱، ۱۰].

پژوهش‌های اولیه درباره سطح عملکرد و تعیین ضریب رفتار سازه‌ها در دهه شصت میلادی پایه‌گذاری شد که در آن‌ها با توجه به گروه‌بندی سازه‌ها از لحاظ درجه اهمیت، تهیه نقشه پهنه‌بندی زلزله و مانند این‌ها یک مقدار مشخص برای ضریب رفتار کل سازه در نظر گرفته می‌شد. پژوهش‌های بیشتر نشان داد که به طور کلی ضریب رفتار سازه‌ها را می‌توان به چندین عامل نسبت داد [12, 13,14]. در ادامه، Chopra با استفاده از تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی یا تحلیل فزاینده غیرخطی به بررسی عامل‌های اثرگذار برضریب رفتار سازه‌ها پرداخت[15, 16, 17]. وی برای در آوردن عامل‌های طیف غیر خطی از روش پاسخ غیرخطی سامانه یک درجه آزادی استفاده کرد و سپس نتیجه‌ها را برای سازه-های چند درجه آزادی گسترش و نشان داد که شکل-پذیری نقش بسیار مهمی در تعیین ضریب رفتار سازه‌ها بازی می‌کند. ضریب اضافه مقاومت نیز از عامل‌های موثر بر ضریب رفتار سازه‌ها شناخته شد. بدین معنی که

با افزایش درجه آزادی یک سازه، مقاومت اضـافی در آن ذخیره خواهد شد. افزون بر ایـن در بسـیاری از موردهـا، طراحی بر اساس آئـین‌نامـه ابعـاد بزرگتـری را بـه سـازه تحمیل می‌کند که این خود باعث ایجاد مقاومـت اضـافی قابل توجهی می‌شود. درجه لرزه‌خیـزی منطقـه و ارتفـاع سازه از دیگر عامـل‌هـای تاثیرگـذار در مقاومـت اضـافی سازه‌ها در نظـر گرفتـه مـی‌شـوند [19 ,18 ,12]. ضـریب نامعینی به عنوان عامل موثر دیگر در ضریب رفتار سـازه-ها، تنها در سیستم‌های مختلف ساختمانی که برای مقابلـه با نیروی افقی از سیستم قاب‌های خمشی، مهاربندی شده و یا ترکیبی در آن‌ها استفاده می‌شود، کـاربرد دارد. یکـی دیگر از عوامل موثر در ضریب رفتـار سـازه‌هـا، ضـریب میرایی می‌باشد. این ضریب نیز فقط هنگامی کـاربرد دارد که المان‌های لزج به طور صریح در مرحله طراحی به کار گرفته شوند[13].

بـا توجـه بـه حجـم بـالای محاسـبات در تحلیـل دینامیکی بـه ویـژه تحلیـل دینـامیکی غیرخطـی، تحلیـل فزاینده غیرخطـی بـه منظـور بررسـی سـطح عملکـرد و ضریب رفتار سازه‌های ساختمانی به تدریج مورد اسـتفاده همگان قرار گرفته است[21 ،۲۰]. شـایان‌فـر و همکـاران [۲۰] به ارزیابی روش تحلیـل فزاینـده غیرخطـی بهنگـام شونده روی قابهای فلـزی خمشـی پرداختنـد. رفـوئی و همکاران[21] نیز به مقایسه روش تحلیل فزاینده غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی در ارزیابی تغییرمکان هـدف قاب‌های ساختمانی پرداختند. با وجود کاربرد وسیع ایـن روش در بـه دسـت آوردن ضـریب رفتـار سـازه‌هـای ساختمانی، به دلیل پیچیـدگی الگوسـازی سـازه‌هـای بـا عملکرد پوسته‌ای مانند مخزن‌ها و نیاز بـه نـرم‌افزارهـای اجزای محدود پیشـرفته بـا قابلیـت برنامـه‌نویسـی بـرای تحلیـل فزاینـده غیرخطـی، ایـن روش در پـژوهش‌هـای پیشین به منظور به دست آوردن ضریب رفتـار ایـن‌گونـه سازه‌ها چندان مورد توجه قرار نگرفته است.

برای تحلیل فزاینده غیرخطی نیاز به الگوی رفتاری مصـالح تشـکیل‌دهنـده سـازه مـورد بررسـی مـی‌باشـد. تلاش‌های گسترده‌ای برای تعیین رفتار غیرخطـی مصـالح صورت پذیرفته که برای الگوی رفتاری بتن مـی‌تـوان بـه الگوی سـاده Mohr-Coulomb [22] الگـوی سـه عـاملی Menetrey and William [23]، الگـوی پـنج عـاملی WilliamوWarnke [24] و بسیاری دیگر اشاره کرد. در بـین الگوهـای مختلـف موجـود، الگـوی پـنج عـاملی William وWarnke [24] بـه دلیـل کامـل‌تـر بـودن آن نسبت به سایر الگوها، هماهنگی بهتـر آن بـا نتیجـه‌هـای آزمایشگاهی، توانایی الگوسازی رفتـار غیرخطـی بـتن در کشش، فشار و بارگذاری دوره‌ای و نیز به دلیـل اسـتفاده آن در نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند ANSYS، بسـیار مناسب می‌باشد[۲۵].

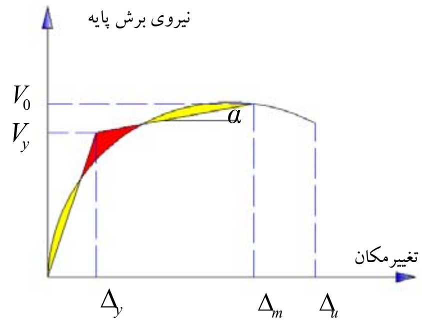
به دلیل اهمیت ضـریب رفتـار در آیـین‌نامـه ۲۸۰۰ ایران که از عامل‌های اساسی بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد و بـه‌دلیـل کـارآیی بسـیار مناسـب روش تحلیـل فزاینـده غیرخطی در تعیین ضریب رفتار سازه‌هـا، کـه تـاکنون در تحلیل مخزن‌ها به کـار گرفتـه نشـده، در ایـن پـژوهش، ضریب رفتـار ناشـی از شـکل‌پـذیری و اضـافه مقاومـت مخزن‌های بتنی استوانه‌ای در دو حالت با پایـه یـا محـور مرکزی (مخزن‌های هـوایی) و بـدون پایـه (مخـزن‌هـای زمینی) مورد ارزیابی قرار می‌گیـرد. بـه‌ایـن منظـور، روی چندین نمونه مخزن استوانه‌ای با تغییر عامل‌های هندسـی مخزن، مقدار میلگرد داخل بتن و نیز تـراز آب داخـل آن تحلیل فزاینده غیرخطی انجام گرفته و در نهایت ضـریب رفتار کلی این سازه‌ها برای سطح‌های عملکرد اولین ترک و نیزگسترش ترک در منبع مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

پایه‌های نظری

تحلیل فزاینده غیرخطی و روش محاسبه ضریب رفتار. در این پژوهش ضـریب رفتـار ناشـی از شـکل‌پـذیری و

افزایش مقاومت با استفاده از پاسخ غیرخطی سازه یک درجه آزادی به دست می‌آید. در این روش برای به دست آوردن عامل‌های طیف غیرخطی، منحنی نیرو- تغییرمکان و سپس منحنی ظرفیت سازه یک درجه آزادی رسم شده و با تقاطع منحنی مذکور با طیف پاسخ ناکشسان و یا طیف کشسان با میرایی معادل، سطح عملکرد و تغییرمکان هدف سازه یک درجه آزادی به دست آمده و سپس نتیجه‌ها برای سازه‌های چند درجه آزادی گسترش داده می‌شود[16]. افزون بر این برای به دست آوردن عامل‌های وابسته به ضریب رفتار سازه، مانند شکل(۱) منحنی نیروی برش پایه بر حسب تغییرمکان به صورت دوخطی مطلوب سازی می‌شود[18]. روش‌های مختلفی برای دوخطی کردن منحنی نیروی برش پایه- تغییر مکان وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش کارمایه که در این پژوهش مورد استفاده قرارگرفته است، اشاره کرد. در این روش، همانند شکل(۱) منحنی دوخطی به گونه‌ای رسم می‌شود که سطح محصور بالا و پایین منحنی با یکدیگر برابر باشند[17]. در این شکل V_y مقاومت تسلیم، V_0 نیروی برشی بیشینه بر روی منحنی دوخطی، Δ_m تغییرمکان متناظربا V_0، Δ_y تغییرمکان متناظر با V_y و Δ_u تغییرمکان نهایی سازه به هنگام شکست می‌باشد.

در این پژوهش برای رسم منحنی نیرو-تغییرمکان، ابتدا شکل مود موثر در حرکت جانبی سازه با استفاده از ضریب‌های مشارکت مودی آنها به دست می‌آید و تغییرمکان در هر گام به صورت ضریبی از شکل مود به سازه داده می‌شود. سپس، نیروی برش پایه نظیر تغییرمکان در گام‌های بارگذاری مختلف تا سطح عملکرد مورد نظر، منحنی فزاینده غیرخطی، به دست آمده و نمودار نیرو- تغییر مکان (Pushover) رسم می‌شود در نهایت نمودار نیرو- تغییر مکان (Pushover) به صورت دوخطی مطلوب سازی و از روی آن ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری و اضافه مقاومت که بیان‌گر ظرفیت بالاتر سازه در رفتار خطی نسبت به رفتار غیرخطی می‌باشند، به دست می‌آیند [17].



شکل ۱ منحنی نیرو- تغییرمکان و نمودار دوخطی مطلوب سازی شده [17]

در حالت کلی ضریب رفتار سازه‌ها از رابطه (۱) به دست می‌آید که در آن R_S ضریب رفتار ناشی از اضافه مقاومت، R_μ ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری، R_R ضریب نامعینی و R_ξ ضریب رفتار ناشی از میرایی می‌باشد [13].

$$R = R_S R_\mu R_R R_\xi \qquad (۱)$$

ضریب اضافه مقاومت که نسبت بیشترین مقاومت جانبی، V_y، به مقاومت طرح آن سازه بر اساس آیین‌نامه، V_d، است از رابطه (۲) به دست می‌آید [13].

$$R_S = \frac{V_y}{V_d} \qquad (۲)$$

برای محاسبه ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری، بنابر مرجع [13] اگر μ ضریب شکل‌پذیری سامانه یک درجه آزادی با بسامد f بوده و به صورت رابطه (۳) تعریف شود، ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری سازه از رابطه (٤) به دست می‌آید. در رابطه (٤) چنانچه α در شکل(۱) مساوی صفر باشد، رفتار کشسان- خمیری کامل حاصل می‌شود.

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \qquad (۳)$$

$$\begin{cases} R_\mu = 1 & f > 33 \\ R_\mu = \sqrt{2\mu - 1 + \alpha(\mu-1)^2} & 2 < f < 33 \\ R_\mu = \mu & f < 2 \end{cases} \qquad (٤)$$

ضریب نامعینی در سازه‌های ساختمانی با سیستم‌های مقاوم خمشی، قاب‌های مهاربندی و یا ترکیبی شامل اعضای تیر و ستون مورد توجه بوده و در مورد مخزن‌ها مقدار آن برابر واحد اختیار می‌شود. میرایی نیز یکی از ویژگی‌های ذاتی سازه‌ها در جذب کارمایه زلزله می‌باشد. در مورد مخزن‌ها با فرض این‌که میرایی در سازه کمتر از ۵٪ باشد، ضریب رفتار ناشی از میرایی برابر با یک در نظر گرفته می‌شود [13].

گام‌های مورد استفاده در این پژوهش برای تحلیل فزاینده غیرخطی(Pushover) مخزن‌ها به ترتیب زیر می- باشد:

گام اول: تحلیل مودال و به دست آوردن شکل مودهای ارتعاشی، انتخاب شمار مودهای ارتعاش جانبی با توجه به ضریب‌های مشارکت مودی و تغییرشکل سازه در آن مود و در نهایت استخراج تغییرمکان نقطه‌های گرهی سازه بازای مود ارتعاش جانبی.

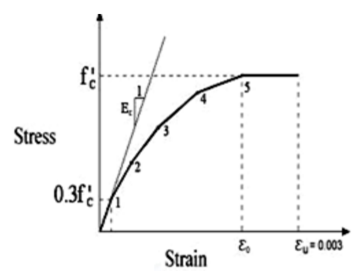
گام دوم: اثر دادن تغییرمکان فزاینده در نقاط گرهی مخزن به صورت ضریبی از شکل مود استخراج شده در هر گام بارگذاری، ادامه وارد ساختن تغییرمکان فزاینده تا گسیختگی کامل نمونه، استخراج نتیجه‌های وابسته به ترک‌خوردگی در گام‌های مختلف و تعیین گام نظیر ایجاد اولین ترک در منبع وگسترش ترک در ضخامت منبع.

گام سوم: به دست آوردن تاریخچه زمانی نیروی برش پایه، رسم منحنی برش پایه بر حسب تغییرمکان بالاترین نقطه مخزن، دوخطی کردن منحنی به دست آمده و به دست آوردن ضریب رفتار برای سطح‌های عملکرد یاد شده.

الگوی رفتاری و معیار گسیختگی مصالح.

بتن. از آنجائی که رفتار بتن در فشار، کشش، بارگذاری چند محوری ایستا و پویا و نیز بارگذاری دوره‌ای متفاوت می‌باشد، یک الگوی رفتاری مناسب برای بتن باید بتواند رفتار بتن پیش از ترک‌خوردگی، آغاز و رشد ترک، رفتار بتن پس از ترک‌خوردگی کامل، چگونگی باز و بسته شدن ترک در هنگام بارگذاری و نیز رفتار بتن زیر تنش های فشاری را به روش مناسبی الگوسازی کند.

در این پژوهش رفتار بتن در محدوده کشسان و پیش از ترک‌خوردگی در کشش به صورت خطی و در فشار بر مبنای پیشنهاد آئین‌نامه[26] ACI318 به صورت غیرخطی مانند شکل(۲) در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن نقاط نظیر منحنی تنش-کرنش نشان داده شده در شکل(۲)، از رابطه‌های(۵) الی (۷) در این پژوهش استفاده می‌شود [26].



شکل ۲ رفتار الاستیک غیرخطی بتن در فشار [26]

$$f = \frac{E_c\,\varepsilon}{1+\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \qquad (٥)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f_c'}{E_c} \qquad (٦)$$

که در روابط فوق، ε و f، کرنش و تنش بتن و E_c ضریب کشسانی بتن می‌باشد. مقدار f_c' نیز از رابطه (۷) و با داشتن ضریب کشسانی بتن به دست می‌آید.

$$E_c = 57000\sqrt{f_c'} \qquad (٧)$$

بنا به الگوی پنج عاملی William و Warnke [24] که برای الگوسازی رفتار غیرخطی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد، سطح گسیختگی بتن را می‌توان با داشتن پنج عامل که شامل مقاومت کششی بتن در آزمایش کشش ساده، f_t، مقاومت تک محوره در آزمایش فشار ساده، f_c'،

مقاومت دو محوره فشاری بتن، f_{cb}، مقاومت تک محوره فشاری بتن به همراه تنش هیدرواستاتیک، f_1، ومقاومت دو محوره فشاری بتن به همراه تنش هیدرواستاتیک، f_2،می‌باشند، تعیین کرد. تنش هیدرواستاتیک نیز از رابطه (۸) به دست می‌آید:

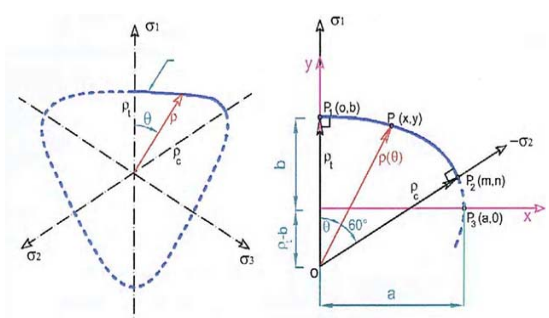
$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \qquad (8)$$

که در این رابطه فوق σ_h تنش هیدرواستاتیک و σ_1، σ_2 و σ_3 تنش‌های اصلی می‌باشند. بنا به الگوی مورد بحث، مذکور ضابطه شکست بتن ناشی از وارد شدن تنش‌های چندمحوره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{F}{f'_c} - S \geq 0 \qquad (9)$$

که در آن F تابعی از تنش‌های اصلی و S سطح شکست می‌باشد که به وسیله تنش‌های اصلی و عامل‌های الگوی William-Warnke مشخص می‌شود [24].

شکل (۳) معیار گسیختگی William-Warnke را در سیستم مختصات قطبی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهد که با یک بیضی تقریب زده می‌شود. در این شکل σ_1، σ_2 و σ_3 تنشهای اصلی و ρ_t و ρ_c شعاع‌های انحنای بیضی می‌باشند [24].



شکل ۳ منحنی شکست William-Warnke. [24]

شکست بتن در این الگو مذکور در چهار حالت برای تنش‌های اصلی $\sigma_1 \succ \sigma_2 \succ \sigma_3$ روی می‌دهد که شامل ۱- فشار-فشار-فشار، ۲- فشار-فشار-کشش، ۳- فشار-کشش-کشش، ٤-کشش،کشش،کشش می‌باشد. در هر یک از این چهار حالت ، تابع‌های مستقلی برای F و S تعریف می‌شود و در نهایت با ترکیب آن‌ها سطح شکست کلی بتن به دست می‌آید. افزون بر این، بنا به این الگو، سطح گسیختگی را با داشتن دست کم دو عامل f_t و f_c می‌توان تعیین کرد و سه عامل دیگر را می‌توان به صورت رابطه‌های (۱۰) الی (۱۲) در نظر گرفت[24].

$$f_{cb} = 1.2 f_c \qquad (10)$$

$$f_1 = 1.45 f_c \qquad (11)$$

$$f_2 = 1.725 f_c \qquad (12)$$

در الگوی William-Warnke فرض می‌شود که پیش از شکست کامل و از دست دادن کل مقاومت کششی و برشی جزء، مجموعه‌ای از جزء‌های آسیب دیده در سازه پدید می‌آیند که هنوز در راستای عمود و مماس بر ترک، سختی خود را صد در صد از دست نداده‌اند. بنا به مرجع[24] رابطه (۱۳) ماتریس سختی جزء آسیب دیده در فشار و رابطه (١٤) ماتریس سختی جزء آسیب دیده درکشش در حالت سه بعدی را نشان می‌دهد. رابطه‌های(۱۳) و (١٤) برای برای مماس و عمود بر ترک ارائه شده و با ماتریس تبدیل، به مختصات اصلی می‌توانند انتقال یابند.

$$D = E^* \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \qquad (13)$$

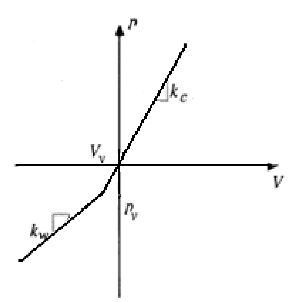
$$D = \begin{bmatrix} \eta E_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_t G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_t G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_t G \end{bmatrix} \qquad (14)$$

در رابطه‌های بالا، $E^* = \frac{E_c}{(1+\nu)(1-2\nu)}$، G مدول برشی، ν ضریب پواسون، β_cضریب انتقال برش ترک بسته (در فشار)، β_t ضریب انتقال برش ترک باز(در کشش) و η ضریب تحمل کشش ترک باز است که در

الگوی William-Warnke مقدارهای β_c، β_t و η عددی ثابت و بین صفر و یک فرض می‌شوند[۲۵، 24]. لازم به یادآوری است که در رابطه (۱۳) اگر جزء سالم باشد $\beta_c = 1$ در نظر گرفته می‌شود.

فولاد. در این پژوهش، رفتار میلگردهای به کار رفته در بتن مسلح، کشسان- مومسان کامل با تنش حد تسلیم F_y،کرنش حد تسلیم ε_y و کرنش نهایی ε_u فرض می‌شود. الگوی رفتاری مورد بحث می‌تواند رفتار فولاد در سازه‌های بتن مسلح را با دقت خوبی الگوسازی کند [26].

آب. بنا به شکل (٤) رفتار آب تا دامنه زیادی از فشار به صورت خطی بوده و تنها در بارهای شدید زلزله ممکن است فشار مطلق آب به قدری کم شود که به فشار بخار برسد که در این‌صورت پدیده کاویتاسیون رخ می‌دهد. مرجع[27] یک رابطه دوخطی فشار- کرنش حجمی را مانند شکل(٤) برای آب مطرح کرده است. نتیجه‌های پژوهش‌ها نشان می‌دهد که پدیده کاویتاسیون تنها در زلزله‌های بسیار شدید احتمال دارد روی بدهد و اثر آن بر سازه قابل توجه نمی‌باشد[27, 28]. در تحلیل فزاینده غیرخطی موج‌های کشسان در محیط آب که می‌تواند سبب ایجاد کاویتاسیون شود، پدید نمی‌آیند. بنابراین، نیاز به الگوسازی رفتار غیرخطی آب در کشش نمی‌باشد. رفتار آب در فشارهای خیلی بالا نیز می‌تواند غیرخطی باشد که این مساله در محدوده کارهای مهندسی عمران مطرح نیست [28]. از این رو، در این پژوهش رفتار آب خطی فرض می‌شود.

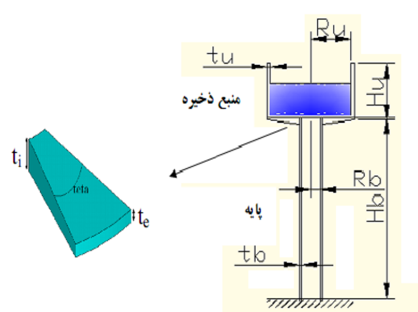


شکل ٤ الگوی دوخطی رفتار آب در فشار و کشش [27]

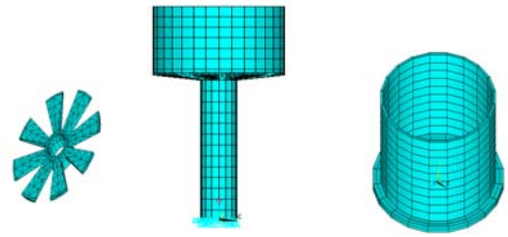
الگوی اجزای محدود

در این پژوهش از برنامه اجزای محدود ANSYS نسخه 9.0 برای الگوسازی و تحلیل مخزن‌های آب استفاده شده است. مخزن‌های مورد مطالعه در این پژوهش شامل مخزن‌های استوانه‌ای هوایی با شافت مرکزی می‌باشد که برای ایجاد پایداری موضعی در کف آنها از یک مجموعه تیرهای سخت‌کننده استفاده می‌شود. برای این منظور جزء سه‌بعدی هشت گرهیSolid65 با سه درجه آزادی در هر گره و قابلیت الگوسازی رفتار بتن مسلح در فشار و کشش و جزء دو گرهی Link8 با یک درجه آزادی در هر گره برای الگوسازی میلگرد و المان سه‌بعدی هشت گرهی Fluid80 با سه درجه آزادی در هر گره برای الگوسازی سیال درون مخزن به روش لاگرانژی مورد استفاده قرار گرفته است.

ویژگی‌های هندسی مخزن‌های مورد مطالعه مانند شکل(۵) می‌باشد که H_u، H_b، R_u، R_b، t_u، t_b ، t_e، t_i ، teta و t_k به ترتیب ارتفاع مخزن ذخیره، ارتفاع پایه، شعاع داخلی مخزن ذخیره، شعاع داخلی پایه، ضخامت مخزن ذخیره، ضخامت پایه، ضخامت خارجی و داخلی تیرهای سخت‌کننده، زاویه آنها و ضخامت کف می‌باشند. حالت ویژه هندسه مخزن به‌ازای $H_b = 0$ می‌باشد که مخزن هوایی تبدیل به مخزن زمینی گردیده و در این حالت $t_e = t_i = teta = 0$ می‌باشد. شکل (٦) نمایی از اجزای محدود مخزن‌های مورد مطالعه و تیرهای سخت‌کننده کف آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۵ ویژگی‌های هندسی کلی مخزن‌های هوایی و تیرهای سخت‌کننده



شکل ٦ نمایی از اجزای محدود مخزن‌های و تیرهای سخت‌کننده

مقدارهای نظیر رفتار کشسان غیرخطی بتن در شکل (۲) و مقدارهای عددی رابطه‌های وابسته به آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول۱ عاملهای رفتار الاستیک خطی و غیرخطی بتن

رفتار الاستیک خطی		
ضریب پواسون ν	چگالی $\rho(kg/m^3)$	مدول الاستیسیته E(GPa)
۰/۲۷	۲۴۰۰	۲۰
رفتار الاستیک غیرخطی		
کرنش	تنش (MPa)	
۰/۰۰۰۲۶۳	۵/۲۶۷	
۰/۰۰۰۶۳۶	۱۱/۲۴	
۰/۰۰۱۰۰۹	۱۵/۱۶	
۰/۰۰۱۳۸۲	۱۷/۰۵	
۰/۰۰۱۷۵۱	۱۷/۵۴	
۰/۰۰۳	۱۷/۵۴	

مقاومت کششی تک‌محوره بتن، f_t و مقاومت فشاری تک‌محوره، f'_c برای معرفی الگوی پنج عاملی William-Warnke به ترتیب برابر با ۲/۵۸ و ۲۱ در نظر گرفته می‌شود. ضمن این‌که ضریب انتقال برش در رابطه (۱۳) برای ترک بسته برابر با ۱ و در رابطه (۱٤) برای ترک باز برابر با ۰/۲ انتخاب می‌شود. در این پژوهش برای میلگرد داخل بتن ضریب کشسانی ۲۰۰ ، تنش تسلیم ۲٤۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ انتخاب و ضریب حجمی و چگالی آب نیز به ترتیب ۲ و ۱۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود [26].

به طور کلی دو روش برای الگوسازی میلگرد در سازه های بتن مسلح به روش اجزای محدود وجود دارد. این روش‌ها شامل الگوسازی میلگرد با المان میله‌ای و نیز معادل سازی آن به صورت درصد حجمی در سه برای محور مختصات می‌باشد که روش دوم به دلیل سادگی و دقت قابل قبول ویژه در سازه‌های با هندسه پیچیده بیشتر مورد توجه می‌باشد. در این پژوهش ابعاد و هندسه مخزن‌های مورد مطالعه در محدوده استانداردهای طراحی فرض شده و درصد فولاد حجمی بخش‌های مختلف پایه، کف و منبع از کمترین تا بیشترین مقدار پیشنهادی مرجع‌های معتبر [26 ، ٦، ١] تغییر داده می‌شود. به منظور بررسی امر الگوسازی میلگرد بر ضریب رفتار سازه، در چندین نمونه از مخزن‌ها که در جدول(۲) با الگوهای m_1تا m_8 نام‌گذاری شده‌اند، به جای استفاده از درصد حجمی فولاد مصرفی به الگوسازی دقیق میلگرد پرداخته شده است. افزون بر این با انجام تحلیل حساسیت شمار جزءهای مورد نیاز برای دستیابی به دقت مورد نظر ضمن کاهش حجم عملیات محاسباتی تعیین شده است. پایان با استفاده از نتیجه‌های تحلیل حساسیت در مورد الگوسازی میلگرد و نیز تعداد جزءهای مورد نیاز، ۲۹ نمونه دیگر که در جدول(۲) با علامت‌های M1 تا M29 نام‌گذاری شده‌اند، با تغییر عامل‌های مختلف هندسه مخزن، درصد میلگرد مصرفی و تراز آب داخل مخزن الگوسازی و تحلیل شده است. در این جدول ویژگی‌های کامل دو الگوی M1 و M24 به عنوان الگوی مرجع به ترتیب برای مخزن‌های هوایی و زمینی آورده شده وویژگی‌های دیگر الگوها با مجموعه‌ای از تغییرها در الگوهای مرجع در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی حساسیت پاسخ به گام‌های بارگذاری از ۲۹ الگو محاسباتی، الگوM5 به‌عنوان نمونه انتخاب و با تغییر ضریب وارد تغییرمکان مودی در هر گام بارگذاری به صورت ۱، ۵ و ۱۰ برابر شکل مودی سازه از علامت M5-LSCi استفاده شده که i نشان دهنده ضریب افزایش وارد تغییرمکان مودی می‌باشد.

جدول۲ ویژگی‌های الگوهای مورد استفاده

الگو	مخزن	پایه R_b, t_b, H_b (m)	منبع R_u, t_u, H_u (m)	سخت‌کننده $t_e, t_i, teta, t_k$ (m)	میلگرد ρ_s, ρ_u, ρ_b
m1	خالی	۳، ۰/۵، ۱	۳، ۰/۳، ۲/۷	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۰/۲	الگوسازی دقیق
m2	خالی	۳، ۰/۵، ۱	۳، ۰/۳، ۲/۷	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۰/۲	۰/۰۱۲۷، ۰/۰۰۹۳، ۰/۰۰٦
m3	خالی	۳، ۱/۵، ۱	٤، ۰/۳، ۲/۷	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۰/۲	الگوسازی دقیق
m4	خالی	۳، ۱/۵، ۱	٤، ۰/۳، ۲/۷	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۰/۲	۰/۰۰۹۳، ۰/۰۰٦
m5	خالی	۱۰، ۰/۵، ۱	۳، ۰/۳، ۲/۷	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۰/۲	الگوسازی دقیق
m6	خالی	۱۰، ۰/۵، ۱	۳، ۰/۳، ۲/۷	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۰/۲	۰/۰۱۲۷، ۰/۰۰۹۳، ۰/۰۰٦
m7	خالی	۰، ۰، ۰	۷، ۰/۵، ۵	۰، ۰، ۰، ۰	الگوسازی دقیق
m8	خالی	۰، ۰، ۰	۷، ۰/۵، ۵	۰، ۰، ۰، ۰	۰/۰۰۸۱۵، ۰/۰۰٦
M1	پر	۳۰، ۰/۵، ۱/۵	٦/۵، ۰/۳، ۷	۰/۵، ۱۵، ۱/۵، ۰/۲	۰/۰۰٦، ۰/۰۲
M2	۲/۳ پر	M1	M1	M1	M1
M3	۱/۳ پر	M1	M1	M1	M1
M4	خالی	M1	M1	M1	M1
M5	خالی	۲۰، ۰/۵، ۱/۵	M1	M1	M1
M6	خالی	۱۰، ۰/۵، ۱/۵	M1	M1	M1
M7	خالی	۳۰، ۰/۶، ۱/۵	M1	M1	M1
M8	خالی	۳۰، ۰/۷، ۱/۵	M1	M1	M1
M9	خالی	۳۰، ۰/۵، ۲	M1	M1	M1
M10	خالی	۳۰، ۰/۵، ۲/۵	M1	M1	M1
M11	خالی	M1	۵/۵، ۰/۳، ۷	M1	M1
M12	خالی	M1	۷/۵، ۰/۳، ۷	M1	M1
M13	خالی	M1	۶/۵، ۰/۲، ۷	M1	M1
M14	خالی	M1	۶/۵، ۰/۴، ۷	M1	M1
M15	خالی	M1	۶/۵، ۰/۳، ۶	M1	M1
M16	خالی	M1	۶/۵، ۵/۳، ۶/۰	M1	M1
M17	خالی	M1	M1	۰/۳، ۱۵، ۱/۵، ۰/۲	M1
M18	خالی	M1	M1	۰/۴، ۱۵، ۱/۵، ۰/۲	M1
M19	خالی	M1	M1	۰/۳، ۲،۱۵، ۰/۲	M1
M20	خالی	M1	M1	۰/۳، ۱۵، ۱، ۰/۲	M1
M21	خالی	M1	M1	M1	۰/۰۰۶
M22	خالی	M1	M1	M1	۰/۰۰۶، ۰/۰۱
M23	خالی	M1	M1	M1	۰/۰۱
M24	پر	۰	۶/۵، ۰/۳، ۷	۰	۰/۰۰۶، ۰/۰۲
M25	۲/۳ پر	M24	M24	M24	M24
M26	۱/۳ پر	M24	M24	M24	M24
M27	خالی	M24	M24	M24	M24
M28	خالی	M24	۶/۵، ۰/۳، ۵	M24	M24
M29	خالی	M24	۸/۵، ۰/۳، ۷	M24	M24

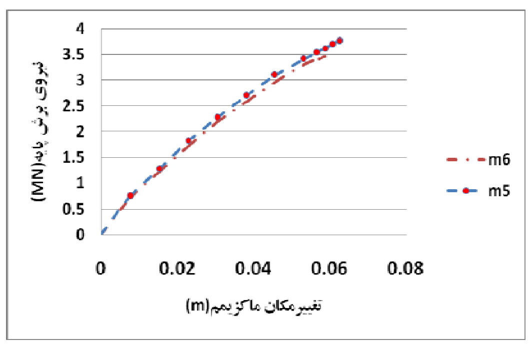
جدول ۳ درصد اختلاف الگوهای m_1 تا m_8

الگو	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8
برش پایه بیشینه (MN)	٨/٥٦	٨/٤	٩/٢٥	٩/١٣	٢/٣٤	٢/٢٥٣	٢/٢	٢/١٨٩
درصد اختلاف	١/٩		١/٣		٣/٨٦		٠/٥	

نتیجه‌های عددی

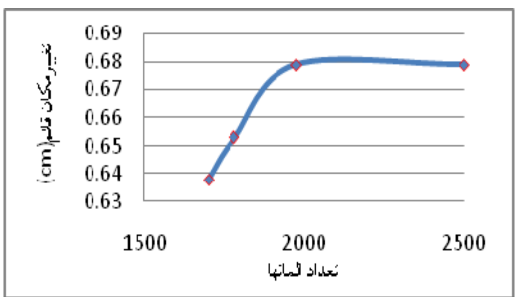
تحلیل حساسیت

برای بررسی تاثیر الگوسازی میلگرد به دو صورت دقیق و درصد حجمی بر عملکرد سازه، الگوهای درج شده درجدول (۲) با روش فزاینده غیرخطی تحلیل شدند. نتیجه‌های به دست آمده که در جدول(۳) آمده اند و نمونه‌ای از آن‌ها در شکل (۷) نشان داده شده، بیان‌گر آن است که الگوسازی میلگرد در بدترین شرایط، حداکثر ٤ درصد اختلاف ایجاد می‌کند. الگوسازی میلگرد نیازمند زیاد کردن شمار جزءها و در نتیجه افزایش حجم عملیات محاسباتی به ویژه در تحلیل غیرخطی خواهد شد و تاثیر ناچیزی در پاسخ برش پایه دارد. بنابراین، در دیگر الگوهایی که در این پژوهش به کار رفته‌اند، از درصد حجمی فولاد در الگوسازی استفاده می‌شود.

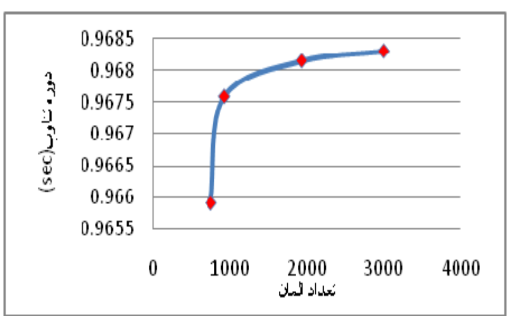


شکل۷ تاثیر الگوسازی میلگرد در پاسخ سازه

در این پژوهش در همه گونه بارگذاری شامل بار وزنی و بار جانبی به جای وارد مستقیم نیرو از تغییرمکان قائم معادل برای بار ثقلی و تغییرمکان فزاینده جانبی معادل برای نیروی افقی استفاده شده است. برای کاهش حجم عملیات محاسباتی ضمن حفظ دقت مورد نظر تحلیل حساسیت برای تعیین شمار جزءها در الگوسازی سازه انجام شده است. در این پژوهش تحلیل حساسیت برای تغییرمکان قائم بالاترین نقطه مخزن و دوره تناوب مود اول ارتعاشی به روش اجزای محدود صورت پذیرفته و با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) که برای مخزن هوایی M5 رسم شده است. از نتیجه‌های مشابه برای دیگر الگوها، نتیجه می‌شود که با به‌کارگیری حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ جزء به ترتیب برای مخزن‌های زمینی و هوایی، دقت قابل قبولی در تغییرمکان ناشی از وزن و شکل مود ارتعاشی اول این سازه‌ها به دست خواهد آمد.

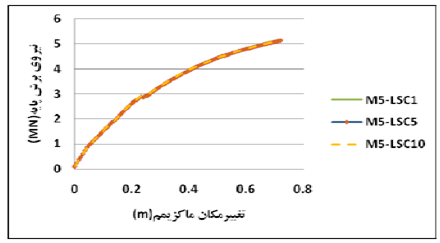


شکل۸ تغییرمکان قائم مخزن هوایی M4 بر حسب شمار جزءها



شکل ۹ دوره تناوب مود اول مخزن هوایی M4 بر حسب شمار جزءها

از در تحلیل ایستای فزاینده غیرخطی به روش وارد کردن تغییرمکان، در هر گام بارگذاری ضریبی از شکل مود ارتعاش جانبی به سازه وارد می‌شود. از این رو، در این پژوهش تحلیل حساسیت نسبت به ضریب وارد کردن تغییرمکان نیزانجام پذیرفته که نتیجه‌های به دست آمده بنا به شکل (۱۰) تاثیر چشم‌گیری را در پاسخ سازه نشان نمی‌دهد.



شکل ۱۰ تاثیر ضریب وارد کردن شکل مود در پاسخ سازه

تحلیل مودال و مودهای حرکت جانبی سازه

با انجام تحلیل مودال و به دست آوردن ضریب‌های مشارکت مودی مودهای گوناگون، مودهایی که ضریب مشارکت مودی بالای ۹۰ درصد دارند، به عنوان مودهای موثر در حرکت جانبی انتخاب می‌شوند[16]. در مورد قاب‌های ساختمانی و نیز سازه‌های با عملکرد طره‌ای مانند مخزن‌ها هوایی، مودهای اول و دوم به عنوان مود ارتعاش جانبی اصلی سازه می‌باشند. ولی در مورد سازه‌های با عملکرد پوسته‌ای ممکن است این مودها به مودهای بالاتر ارتقا پیدا کنند. مطابق جدول (٤) در مورد یک نمونه ازمخزن‌های استوانه‌ای هوایی، مود اول و یک نمونه از مخزن‌های استوانه‌ای زمینی، مود یازدهم به عنوان مود ارتعاش جانبی در نظر گرفته می‌شود.

جدول٤ ضریب‌های مشارکت مودی مخزن‌ها

شماره مود	ضریب مشارکت مودی مخزن‌ها	
	هوایی	زمینی
۱	۱	۰/۰۰۰۰۱۳
۲	۰/۰۰۰۶۵۳	۰/۰۰۰۰۱۱
۳	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۱۰٤
٤	۰/۳۷۶۱۷۳	۰/۰۰۰۱۵۲
۵	۰/۰۰۰۹۹۳	۰/۰۰۰۳۵۹
۱۱	۰/۲۷۹٤۳۶	۱

برای وارسی درستی نتیجه‌ها، دوره تناوب مخزن‌های مورد مطالعه به روش جرم متمرکز در انتهای تیر طره نیز به دست آمده و با نتیجه‌های حاصل از نرم‌افزار مقایسه شده‌اند و افزون بر این، به‌ازای مودهای مختلف شکل مود ارتعاشی رسم شده و با مقایسه آن‌ها، از درستی انتخاب مود ارتعاش جانبی اطمینان حاصل شده است[12 ، ۱۱].

تحلیل فزاینده غیرخطی

در این پژوهش، الگوهای ارائه شده در جدول (۲) به روش وارد ساختن تغییرمکان فزاینده، تحلیل فزاینده غیرخطی شده و تاثیر عامل‌های مختلف بر ضریب رفتار این‌گونه سازه‌ها بررسی شده است. به این منظور، دو گونه سطح عملکرد A و B تعریف می‌شوند که سطح عملکرد A نشان‌دهنده بروز اولین ترک در منبع ذخیره و سطح عملکرد B نشان‌دهنده گسترش ترک در منبع می‌باشد. لازم به یادآوری است، سطوح عملکرد برای عملکرد بی‌وقفه سازه در این هنگام زلزله تعریف شده و در صورت گسترش بیش از حد ترک در منبع ذخیره، این‌گونه سازه‌ها از بهره برداری خارج می‌شوند. بنابراین، سطح عملکرد آستانه فروریزش در مورد آن‌ها کاربرد نخواهد داشت. در ضمن، سطح عملکرد اولین ترک در پایه نیز به دلیل وارد نشدن سازه به محدوده غیرخطی، ضریب رفتاری برابر با یک را نتیجه خواهد داد که به دلیل غیر اقتصادی بودن موردنظر نمی‌باشد.

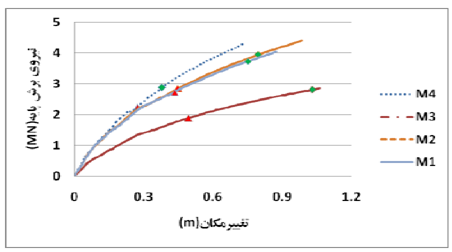
در شکل‌های (۱۱) الی (۱۷) نتیجه‌های تحلیل فزاینده غیرخطی برای الگوهای مختلف ارائه شده است که در آن‌ها منحنی تغییرات نیروی برش پایه بر حسب تغییرمکان بالاترین نقطه منبع آورده شده است. دوره تناوب، ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری و ضریب رفتار کلی مخزن‌های مورد مطالعه که از شکل‌های (۱۱) الی (۱۷) نتیجه شده‌اند، به‌ازای سطح‌های عملکرد A و B که به ترتیب با مثلث و لوزی مشخص شده‌اند، در جدول (۵) ارائه شده است.

شکل(۱۱) تاثیر الگوسازی ترازهای مختلف آب داخل مخزن بر منحنی فزاینده غیرخطی و ضریب رفتار مخزن‌های بتنی هوایی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، الگوسازی آب درون مخزن در وضعیت‌های مختلف تاثیر متفاوتی بر رفتار این سازه‌ها خواهند داشت، به طوری‌که در حالت دو سوم پر و پر منحنی‌ها باتقریب بر هم منطبق و درحالت یک سوم پر و خالی شکل‌پذیری و سختی متفاوتی خواهند داشت.

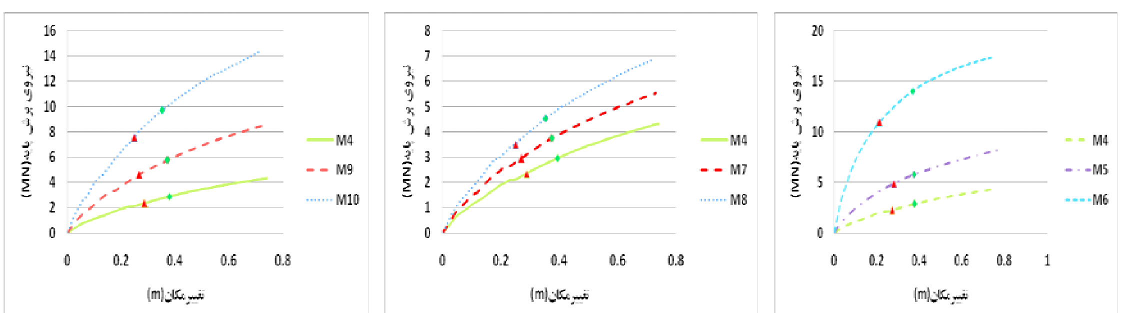
شکل(۱۲) تاثیر ویژگی‌های پایه مخزن شامل ارتفاع، ضخامت و شعاع پایه بر منحنی نیروی برش پایه بر حسب تغییرمکان بالاترین نقطه مخزن را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل مشخص است، ویژگی‌های پایه به شدت بر روی شکل‌پذیری و سختی سازه تاثیرگذار خواهد بود.

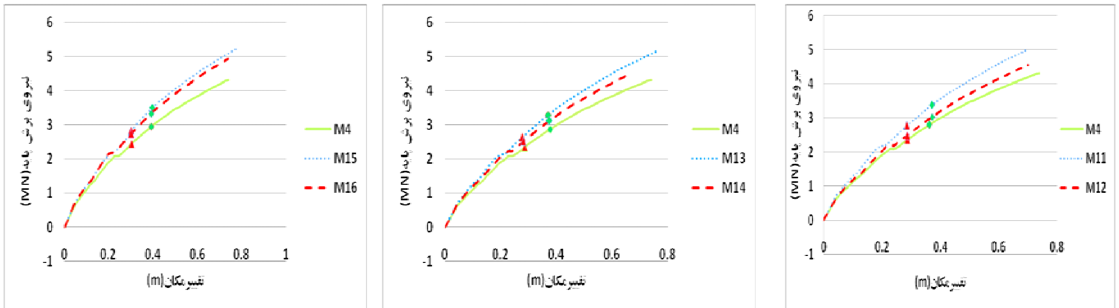
شکل(۱۳) نیز تاثیر ویژگی‌های منبع ذخیره شامل ارتفاع، ضخامت و شعاع منبع بر منحنی نیروی برش پایه بر حسب تغییرمکان بالاترین نقطه مخزن را نشان می‌دهد. با مقایسه منحنی‌های به دست آمده، مشخص می‌شود که تاثیر ویژگی‌های منبع ذخیره نسبت به ویژگی‌های پایه بر شکل‌پذیری و سختی سازه کمتر می‌باشد.



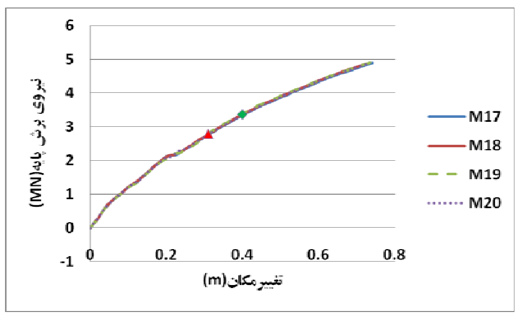
شکل۱۱ تاثیر الگوسازی آب داخل مخزن بر ضریب رفتار مخزن‌ها هوایی



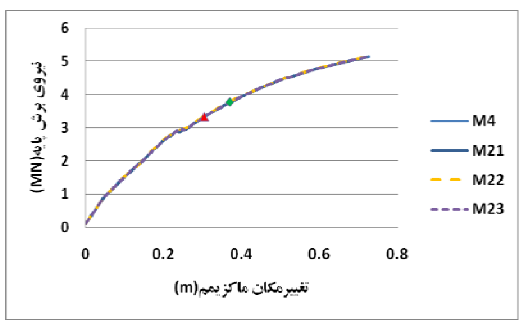
شکل۱۲ تاثیر ویژگی‌های پایه مخزن بر منحنی فزاینده غیرخطی



شکل۱۳ تاثیر ویژگی‌های منبع ذخیره بر منحنی فزاینده غیرخطی



شکل۱٤ تاثیر ویژگی‌های سخت کننده بر منحنی **تحلیل فزاینده غیرخطی**



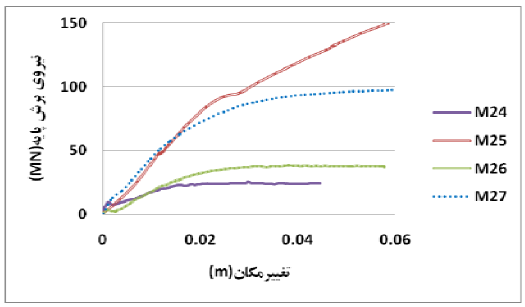
شکل۱۵ تاثیر درصد فولاد حجمی بر منحنی **تحلیل فزاینده غیرخطی**

شکل(۱٤) تاثیر ویژگی‌های سخت کننده و ضخامت کف مخزن و شکل(۱۵) تاثیر درصد فولاد حجمی بر منحنی نیروی برش پایه بر حسب تغییرمکان بالاترین نقطه مخزن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل‌ها آشکار است، ویژگی‌های سخت‌کننده و درصد فولاد حجمی تاثیر بسیار ناچیزی بر شکل‌پذیری و سختی سازه خواهد داشت.

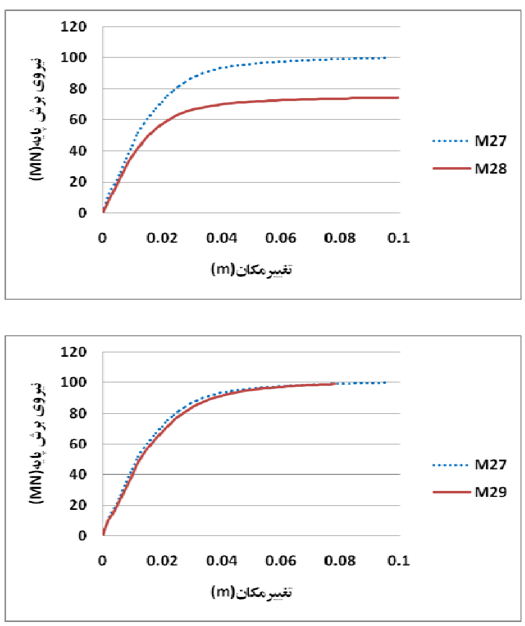
شکل(١٦) و (١٧) تاثیر تراز آب داخل مخزن و نیز ویژگی‌های هندسی منبع ذخیره شامل ارتفاع وشعاع منبع بر منحنی نیروی برش پایه بر حسب تغییرمکان بالاترین نقطه مخزن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، ترازهای مختلف آب داخل مخزن تاثیر

متفاوتی بر شکل‌پذیری و سختی این سازه‌ها خواهد داشت و تاثیر تغییرهای شعاع منبع ذخیره نسبت به تغییرهای ارتفاع آن بر شکل‌پذیری و سختی سازه بیشتر خواهد بود. به سخن دیگر، تغییر شعاع منبع تاثیر چشم‌گیری بر رفتار مخزن‌های بتنی زمینی داشته، در حالی‌که تاثیر ارتفاع منبع بر رفتار این سازه‌ها ناچیز به نظر می‌رسد.

ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و ضریب رفتار کلی مخزن‌های مورد مطالعه برای سطح‌های عملکرد A و B در جدول(۵) ارائه شده است. در نهایت، ضریب رفتار کلی مخزن‌ها با میانگیری از مقدارهای جدول (۵) به دست می‌آید.



شکل۱٦ تاثیر الگوسازی آب بر منحنی تحلیل فزاینده غیرخطی



شکل۱۷ تاثیرویژگی‌های منبع ذخیره بر منحنی تحلیل فزاینده غیرخطی

جدول۵ محاسبه ضریب رفتار مخزن‌ها به‌ازای سطح‌های عملکرد A و B

الگو	T(sec)	سطح عملکرد A			سطح عملکرد B		
		R_{μ}	R_S	R	R_{μ}	R_S	R
M1	۲/۲	۱/۲۱	۳/۶۲۵	۴/۳۸۶	۱/۳۹	۴/۷۵	۶/۶
M2	۱/۹۵۵	۱/۱۸۴	۳/۶۵	۴/۳۲	۱/۳۶۶	۵	۶/۸۳
M3	۱/۸۱	۱/۳۸۸	۳/۶۲۵	۵/۰۳	۱/۲۵	۳/۵	۴/۳۷۵
M4	۱/۳۲۸	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۷	۳/۷۲۵	۵/۰۵
M5	۰/۷۵۸۴	۱/۳۶۳	۲/۶	۳/۵۴	۱/۳۵۷	۲/۸	۳/۸
M6	۰/۳۳۶۴	۱/۲۲	۳	۳/۶۶	۱/۳۱	۳/۷۵	۴/۹۱
M7	۱/۱۲۹۷	۱/۱۷۴	۳/۳۳	۳/۹	۱/۱۲۵	۴	۵
M8	۱/۰۱۴۴	۱/۱۳۶	۳/۶۶	۴/۱۵۷	۱/۰۹۶	۴/۴	۴/۸۲
M9	۰/۹	۱/۱۲۵	۳/۷۵	۴/۲۲	۱/۲۳	۴/۷۵	۵/۸۴
M10	۰/۶۸۳	۱/۲۵	۴/۶۹	۵/۸۶	۱/۱۳	۶	۶/۷۸
M11	۱/۲۲۹	۱/۱۶	۳/۳۷۵	۳/۹۱۵	۱/۲۲	۴/۲۵	۵/۱۸۵
M12	۱/۳۲۷	۱/۲۱	۳/۰۶	۳/۷	۱/۲۲	۳/۷۵	۴/۵۷۵
M13	۱/۱۸۰۷	۱/۱۶۶	۳/۲۵	۳/۷۸۹	۱/۱۵۶	۴/۱۲۵	۴/۷۶۸
M14	۱/۲۵	۱/۳۲	۳/۰۵	۴/۰۲۶	۱/۲۵۲	۳/۹۲	۴/۹۰۷
M15	۱/۱۹۵	۱/۱۲	۳/۵	۳/۹۲	۱/۱۴۷	۴/۳۷۵	۵/۰۲
M16	۱/۲۶۱	۱/۱۶۶	۳/۳۷۵	۳/۹۳۵	۱/۲۱۸	۴/۱۲۵	۵/۰۲۴
M17	۱/۲۴۷	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۶	۳/۷۲۵	۵/۰۴۷
M18	۱/۲۸۸	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۶	۳/۷۲۵	۵/۰۴۷
M19	۱/۳۶۳	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۵	۳/۷۲۵	۵/۰۴۵
M20	۱/۲۹۰۶	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۵	۳/۷۲۵	۵/۰۴۵
M21	۱/۳۱۶۸	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۶	۳/۷۲۵	۵/۰۴۷
M22	۱/۳۲	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۵	۳/۷۲۵	۵/۰۴۵
M23	۱/۲۸۷۸	۱/۴۵	۲/۸۷۵	۴/۱۶۸	۱/۳۵۴	۳/۷۲۵	۵/۰۴۳
M24	۰/۰۶۲	۱	۱	۱	۱/۴۱۴	۲/۳	۳/۲۵
M25	۰/۰۱۹۲	۱	۱	۱	۱/۲۴۲	۲/۲۵	۲/۷۹۴
M26	۰/۰۳۰۵	۱	۱	۱	۱/۲۸۸	۳	۳/۸۶۴
M27	۰/۰۲۴۶	۱	۱	۱	۱/۲۴۹	۱/۵	۱/۸۷
M28	۰/۰۲۳۵	۱	۱	۱	۱/۱۷۵	۱/۴۵۴	۱/۷۰۸
M29	۰/۰۳۱	۱	۱	۱	۱/۱۸۳	۱/۴۶	۱/۷۲۷

نتیجه‌گیری

آنچه که از نتیجه‌های تحلیل بر روی الگوهای مختلف به دست آمده، به شرح زیر است:

۱- تغییر ویژگی‌های هندسی پایه بیشترین تاثیر را در منحنی تحلیل فزاینده غیرخطی و ضریب رفتار مخزن‌ها بازی می‌کند.

۲- تغییر ویژگی‌های منبع ذخیره و درصد فولاد حجمی در محدوده مجاز آیین‌نامه تاثیر چندانی بر ضریب رفتارآن‌ها ندارد.

۳- مود ارتعاش جانبی مخزن‌های بتنی هوایی، مود اول و دوم بوده و درصد ضریب مشارکت مودی این مودها بالای ۹۰ درصد است. در حالی که برای مخزن‌های زمینی مودهای ارتعاشی اول، مودهای کمانش صفحه-ای بوده و مود جانبی سازه به مود دهم و یازدهم ارتقا پیدا کرده است.

٤- در مخزن‌های بتنی هوایی برای سطح عملکرد *A*، مقدار ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری در محدوده ۱/۱۲ الی ۱/٤٥ و ضریب اضافه مقاومت در محدوده ۲/٦ الی ۳/٦٦ تغییر کرده که به طور متوسط مقدارهای۱/۳ و ۳/۳ را می‌توان برای آن‌ها در نظر گرفت.

٥- در مخزن‌های بتنی هوایی برای سطح عملکرد *B*، مقدار ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری در محدوده ۱/۱۳ الی ۱/۳٥۷ و ضریب اضافه مقاومت در محدوده ۲/۸ الی ٦ تغییر می‌کند که به طور متوسط مقدارهای۱/۳ و ٤/۱ را می‌توان برای آنها در نظر گرفت.

٦- ضریب رفتار کلی مخزن‌های بتنی هوایی برای سطح عملکرد A در محدوده۳/٦٦ الی ٥/۸٦ و برای سطح عملکرد B در محدوده ٤/۳۷٥ الی ٦/۷۸ تغییر می‌کند که به ترتیب مقدارهای متوسط٤/۲ و ٥/۲ را می‌توان برای آن‌ها در نظر گرفت.

۷- در مورد مخزن‌های زمینی رفتار غیرخطی سازه با ایجاد اولین ترک در منبع آغاز می‌شود. بنابراین، ضریب رفتار این گونه سازه‌ها برای سطح عملکرد اولین ترک در پوسته برابر ۱ می‌باشد. با گسترش ترک در ضخامت پوسته(سطح عملکرد B)، این نوع مخزن‌ها از بهره برداری خارج می‌شوند.

۸- در مخزن‌های زمینی برای سطح عملکرد *B*، ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری در محدوده ۱/۱۷٥ الی ۱/٤۱٤ و ضریب اضافه مقاومت در محدوده ۱/٤٥٤ الی ۳ تغییر می‌کند که به طور متوسط مقدارهای۱/۳ و ۲ را می‌توان برای آنها در نظر گرفت.

۹- ضریب رفتار کلی مخزن‌های بتنی زمینی برای سطح عملکرد A ، ۱ می‌باشد و برای سطح عملکرد B در محدوده ۱/۷۰۸ الی ۳/۸٦٤ تغیر می‌کند که مقدار متوسط ۲/٥ را می‌توان برای آن‌ها در نظر گرفت.

مراجع

۱. نشریه ۱۲۳سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، " ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخزن‌ها آب زمینی" معاونت فنی دفتر پژوهشات و معیارهای فنی، (۱۳۷٤).

۲. استاندارد ۲۸۰۰، "آئین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله" ویرایش سوم، مرکز پژوهشات ساختمان و مسکن، (۱۳۸٤).

3. Housner, G. W., "Dynamic pressure on accelerated fluid containers", Bulletine of the Seismological Society of America, 53 (1), pp. 15-35, (1963).

4. Kana, D. D., and Dodge, E. E., "Design support modeling of liquid slosh in storage tanks subjected to seismic excitation", ASCE, pp. 307-337, (1975).

5. American petroleum Institute, "Welded steel tanks for oil storage", Standard 650, Washington, D.C.

٦. شکیب، حمزه و حسینی، مازیار، "تحلیل و بررسی رفتار مخزن‌ها بتنی هوایی آب تحت تأثیر نیروی زلزله" تهران، موسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شماره ۱۱، صفحه ۹٦-۷٥، (۱۳۷٥).

7. Rofooei, F. R., and Attari, N. K., “Lateral response of structures containing a cylindrical liquid tank under the 1:1 internal fluid/structure resonances”, *Journal of Applied mathematics,* 1(1), (2008).

۸. کلانی ساروکلائی، لیلا و نوائی‌نیا، بهرام، "مقایسه روشهای اویلری و لاگرانژی در تحلیل مخزن‌ها بتنی هـوایی بـا احتسـاب انـدرکنش آب و سازه"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تبریز، (۱۳۸۷).

۹. کلانی ساروکلائی، لیلا و نوائی‌نیا، بهرام و واثقی امیری، جواد و حسینعلی بیگی، مرتضی، "تحلیل مخزن‌ها بتنی هوایی آب با در نظـر گـرفتن اندرکنش سازه و سیال تحت اثر زلزله"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، (۱۳۸۷).

۱۰. کلانی ساروکلائی، لیلا و نوائی‌نیا، بهرام، "تحلیل فزاینده غیرخطی مخزن‌ها بتنی مکعبی زمینی و تعیین ضریب رفتار ناشی از شـکل‌پـذیری"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، (۱۳۸۹).

۱۱. کلانی ساروکلائی، لیلا و نوائی‌نیا، بهرام، "تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مخزن‌ها بتنی هوایی و تعیین ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، (۱۳۸۹).

12. Applied Technology Council., ATC, Structure response modification factors, No.19, (1995).

13. Whittaker, A. S., Uang, C. M., and Bertero, V.V., “Earthquake simulation tests and associated studies of a 0.3scale model of a six-story eccentrically braced steel structure”, Report No. UCB/EERC-87/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA., (1987).

14. Applied Technology Council., ATC,Guidelines and commentary for seismic rehabilitation of building, No. 33, (1996).

15. Chopra, A. K., “Dynamics of structure, Theory and Applications to Earthquake Engineering”, Prentice Hall, (1995).

16. Chopra, A. K., and Chintanapakdee. R., “Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures, single degree of freedom bilinear systems”, Report No. EERC 2003-09 at earthquake engineering research center, University of California Berkeley, (2003).

17. Chopra, A. K., and Geol, R. K., “A modal pushover procedure to estimate seismic demands for buildings”, *fifth national conference on earthquake,* Turkey, (2003).

18. Uang, C.M., “Establishing R and CD factors for building seismic provisions”, *J.Structural Enggineering,* 117 (1), (1991).

19. Asgarian, B., and shokrgozar, H. R., “BRBF response modification factor”, *J. Cons. Steel research 65,* pp. 290-298, (2009).

۲۰. شایانفر، محسنعلی، شاکری، کاظم و رستمی‌نژاد، انتصار، "مقایسه و ارزیابی روشهای تحلیل فزاینـده غیرخطـی بهنگـام شـونده روی قابهـای فلزی خمشی"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، (۱۳۸۹).

21. Rofooei, F. R., Attari, N. K., Rasekh, A., and Shodja, A. H., “Comparison of static and dynamic pushover analysis in assessment of the target displacement”, *Journal of Civil Engineering,* 4 (3), (2006).

22. Rericha, P., “Mohr-Coulomb failure condition and the direct shear test revisited”, Acta Polytechnica, 44 (5-6), (2004).

23. Menetrey, P., and William, K. J., “Triaxial failure criterion for concrete and its generalization”, ASC, *structural journal,* 92(3), pp. 311-318, (1995).
24. William, K. J., and Warnke, E. P., “Constitutive model for the triaxial behavior of concrete”, Proc. Int1. Assoc. Bridge Struct. Engrs, Report No. 19, Section III, Zurich, p.30, (1975).

۲۵. جاهدمطلق، حمیدرضا ، نوبان، محمد رضا و اشراقی، محمدامین، "اجزاء محدود ANSYS"، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸۳).

26. ACI318-05., “Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary”, (2005).
27. El-Aidi, B., and Hall, J., “Nonlinear earthquake response of concrete gravity dams, part. 1: Modeling”, *J. Earthquake Eng. Structural Dyn.,* 18, pp. 837-851, (1989).
28. Vatani Oskouei, A., and Dumanglu, A. A., “Nonlinear dynamic response of concrete gravity dams: cavitation effect”, *J. Soil Dynamic and Earthquake Engineering,* 21, pp. 99-112, (2001).